第46卷 第8期
2023年8月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 8
Aug. 2023

黄河源区夏季地表温度变化研究

唐太斌[1]， 周 保[1]， 金晓媚[2]， 魏赛拉加[1]， 马 涛[1]， 张永艳[1]
（1. 青海省地质环境监测总站，青海 西宁 810008；2. 中国地质大学（北京）水资源与环境学院，北京 100083）

摘 要： 利用较高空间分辨率的Landsat卫星数据，以覃志豪单窗算法反演黄河源区1990—2018年（间隔3~5 a）的夏季（7月或8月）地表温度，并对反演结果进行相关性分析。结果表明：（1）黄河源区夏季地表温度平均值与MODIS地表温度产品的平均值相关系数不高，约为0.5，主要原因是Landsat数据与MODIS产品的空间分辨率不一致。（2）水体的地表温度基本保持不变，其他地物的地表温度均呈现上升趋势，冰川的地表温度升高最快。（3）黄河源区各年份地表温度与高程存在明显的负相关关系，相关系数平均值为−0.65。（4）空间上，黄河源区地表温度值与土壤湿度值的空间分布存在负相关关系。（5）在气候因素中，降水与地表温度存在明显的负相关关系，其相关系数小于−0.5的区域约占整个源区面积的70%。

关 键 词： 黄河源区；地表温度；遥感反演；变化特征；影响因素
文章编号： 1000－6060(2023)08－1250－10(1250～1259)

黄河源区作为黄河的发源地，是中华水塔的重要组成部分。源区生态环境敏感、脆弱，近几十年来，源区多年冻土已发生大面积退化并日趋严重[1]，植被范围逐渐减少，草场退化、水土流失严重等生态环境问题日趋严重。地表温度是地表、大气及太阳之间的热量交换，不少学者将其视为监测地球环境动态变化的重要指标之一。有学者将地表温度应用于灾害监测，如利用热红外异常来研究地表温度与地震发生的关系[1]。研究黄河源区地表温度是深入研究三江源地区能量循环、环境保护的基础，可为黄河源区的生态保护及三江源气候变化与生态响应提供科学依据。同时，精确反演地表温度对于全球气候变化的研究、地球环境灾害监测及自然资源管理有着极其重要的意义[2]。

单通道算法是利用卫星传感器上的一个热红外通道来获得地表的辐射能量，并利用大气的温度廓线、湿度廓线和压力廓线，建立大气辐射传输方程，以此为基础来消除大气以及地表比辐射率对地表温度的影响，进一步通过普朗克函数反演得到地表温度[3]。覃志豪等[4]利用Landsat TM数据的第6波段，推出了只需3个参数反演地表温度的算法，其具有较高反演精度。毛克彪等[5]首次利用覃志豪提出的基于Landsat TM数据的单窗反演算法，对MODIS卫星的第31、32波段建立了辐射率与温度的线性经验关系式。毛克彪等[6]首次推导出了适用于ASTER传感器的单窗算法，该算法更适合于小区域的温度空间差异分析。Landsat卫星具有空间分辨率高、观测时间序列长的优势，已经有接近40 a的观测数据。其次，Landsat是一种多光谱数据，光谱信息丰富且存储数据多，其热红外波段对地物的热信息比较敏感。因此，本文选用Landsat数据反演黄河源区夏季的地表温度。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河源区（33°~35°N，95°~102°E）位于青藏高原东部、青海省南部（图1），南北长约171 km，东西

收稿日期： 2022-10-14； **修订日期：** 2022-12-08
基金项目： 青海省科技厅应用基础研究项目（2021-ZJ-T08）资助
作者简介： 唐太斌（1995-），男，工程师，主要从事冰川冻土等方面的研究. E-mail: 2435729762@qq.com
通讯作者： 周保（1984-），男，正高级工程师，主要从事地质灾害、冰川冻土等方面的研究. E-mail: 41448053@qq.com

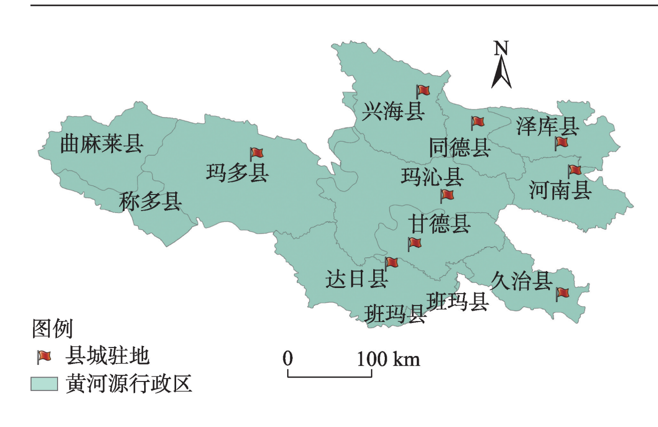


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

长约232 km，面积约14.75 km²，平均海拔在4000 m左右，最高约6200 m。研究区属高原大陆性气候，气温相对较低，早晚温差大，夏季多年平均气温为3.67 ℃。源区蒸散发相对强烈，年均蒸发量达到1200~2000 mm，2001—2009年黄河源年蒸散量增加明显[7-8]。

1.2　研究数据

本研究选取1990、1995、2000、2005、2010年7月或8月Landsat5的TM数据，选取2015、2018年7月或8月Landsat8的OLI/TIRS数据，由于Landsat扫描面积相对较小，同一月份很难拼出完整覆盖研究区的影像，需要多幅影像镶嵌而成，选取时云量低于10%，则向相邻（前后）年度取缺少部分的影像。本文采用空间分辨率为30 m的SRTM-DEM高程数据，来自中科院地理空间数据云网站（http://www.gscloud.cn）；气象数据来自中国气象数据网（http://data.cma.cn）；土壤湿度数据来自GLDAS全球陆面数据同化系统（https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets）。

1.3　研究方法

1.3.1　*反演方法*　覃志豪针对Landsat 5数据的热红外波段特点，根据地表热辐射传导方程推导出了精度较高的地表温度反演算法[4]，主要是将大气和地表的作用直接反映在公式中，公式如下[4]：

$$T_s=\{a(1-C-D)+[b(1-C-D)+C+D]T_{sensor}-DT_a\}/C \quad (1)$$

$$C=\tau\varepsilon \quad (2)$$

$$D=(1-\tau)[1+(1-\varepsilon)\tau] \quad (3)$$

式中：T_s为实际地表温度（K）；a、b为回归系数（a=−37.3556，b=0.4586）；T_{sensor}为传感器亮度温度（K）；T_a为大气平均作用温度（K）；τ为大气透过率；ε为地表比辐射率；C、D为关于τ与ε的函数。该方法适用于只有一个热红外波段的遥感数据[9]，且仅需地表比辐射率、大气透过率、大气平均作用温度3个参数即可实现地表温度的反演。

国内外学者针对Landsat8 TIRS的第10波段，对单窗算法公式中的a、b 2个参数进行拟合，得到Landsat8 TIRS波段10的地表温度反演算法公式[4]：

$$T_{s_{10}}=\{a_{10}(1-C_{10}-D_{10})+[b_{10}(1-C_{10}-D_{10})+C_{10}+D_{10}]T_{sensor_{10}}-D_{10}T_a\}/C_{10} \quad (4)$$

式中：$T_{s_{10}}$为Landsat8 TIRS波段10反演得到的地表温度（K）；$T_{sensor_{10}}$为Landsat8 TIRS波段10的传感器亮度温度（K）；a_{10}、b_{10}为回归系数（表1）；C_{10}、D_{10}为关于中间变量τ_{10}与ε_{10}的函数，根据以下公式得到：

$$C_{10}=\tau_{10}\varepsilon_{10},\quad D_{10}=(1-\tau_{10})[1+\tau_{10}(1-\varepsilon_{10})] \quad (5)$$

表1　Landsat8 TIRS波段10的回归系数取值[10]

Tab. 1　Regression coefficient value of Landsat8 TIRS band 10[10]

温度/℃	a_{10}	b_{10}	R^2
20~70	−70.1775	0.4581	0.9997
0~50	−62.7182	0.4339	0.9996
−20~−30	−55.4276	0.4086	0.9996

注：a_{10}、b_{10}为Landsat8 TIRS波段10的回归系数；R^2为决定系数。

1.3.2　*分析方法*　本文分析利用一元线性回归趋势分析方法来计算每个像元在1990—2018年（间隔3~5 a）的变化趋势，分析黄河源区夏季地表温度的变化情况，计算公式为[11]：

$$\text{QinLST}_{slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times\text{QinLST}_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}i\times\text{QinLST}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \quad (6)$$

式中：QinLST_{slope}为每个像元在这7 a变化趋势的斜率；i为年序号（i=1, 2, 3, …, n）；QinLST_i为第i年夏季的覃志豪算法地表温度值。$\text{QinLST}_{slope}>0$说明地表温度在上升，$\text{QinLST}_{slope}<0$，说明地表温度值在下降。

数学家皮尔逊基于极大似然法提出变量之间的相关系数（r），被用来衡量2个变量之间线性关系的强弱。r的正负代表着变量间的相关性质，若其r越接近于1，则说明两组数据之间的正相关性越强。本文通过计算皮尔逊相关系数来反映地表温

度与其影响因素之间的关系，计算公式如下[12]：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})\times(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

式中：i为第几年；n为时间序列长度；x_i、y_i为第i年的样本值；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别为样本值x、y的平均值。

1.3.3 *反演参数的确定* 覃志豪地表温度单窗反演算法需要确定3个物理参数：(1) 地表比辐射率，指物体与黑体在同温度、同波长下辐射出射度的比值[13-14]。在确定传感器测距范围和像素尺寸时，地表比发射率的大小主要取决于地表材料的组成、形状和结构[15]。研究区的地表比辐射率根据其像元中的土地利用类型及植被指数计算[16-19]，本研究区将地表划分为水体、植被、自然地表(裸地+建筑用地+冰川)。(2) 大气透过率，指电磁波在大气中传播时，经大气衰减后的电磁辐射通量与入射时电磁辐射通量的比值，其大小主要由大气状况、入射点高度等因素决定。本文利用覃志豪等提出结合水汽含量动态变化的大气透过率方程进行估算[20-25]。(3) 大气平均作用温度，主要受大气分子的活跃状态、大气剖面温度及大气成分的运动特征等影响[26]。本文将根据大气平均气温与地表高程之间的关系，通过大气模拟，得出在不同大气模式及不同大气剖面的背景下，估算大气平均作用温度[27-28]。其中地表比辐射率的计算需要用Landsat多光谱数据求得植被指数NDVI，再利用像元二分模型计算得到植被覆盖率，结合不同地物类型的地表求得整个源区地表比辐射率。大气透过率主要受大气水汽含量的影响，借助经验公式求得大气透过率的值。根据不同大气模式的经验公式估算得到大气平均作用温度。

1.3.4 *地表温度反演* 原始数据经过一系列预处理后，需要进行辐射亮温的计算，利用Planck公式进行亮度温度值的转化，即可获得地表温度，公式如下[4]：

$$T_{sensor}=\frac{K_2}{\ln\left(1+\frac{K_1}{L_{sensor}}\right)} \tag{8}$$

式中：T_{sensor}为传感器亮度温度(K)；L_{sensor}为经过预处理之后的辐射亮度($w\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot\mu m^{-1}$)；$K_1$、$K_2$为常量，可从影像数据文件中获得(表2)。

根据公式(1)、(4)、(6)即可反演得到地表温度。

表2 辐射常数K

Tab. 2 Radiation constant K

卫星及波段	K_1	K_2
Landsat5 波段6	607.76	1260.56
Landsat8 波段10	774.89	1321.08

2 结果与分析

2.1 反演结果的验证

将覃志豪反演地表温度(简称反演地表温度)与MODIS地表温度进行对比验证。由于MODIS数据仅在2000年以后才有数据产品，因此选取2000、2005、2010、2015、2018年夏季MODIS地表温度数据进行验证(图2)。

总体上，反演地表温度的平均值高于MODIS地表温度的平均值，这是由于相对于其他热红外传感器，Landsat数据具有非常高的空间分辨率，而MODIS数据分辨率较低，其混合像元包含的地物信息变化相对更大，会拉低整体的地表温度值，另外黄河源区扎陵湖及鄂陵湖的面积较大，进一步影响了黄河源区夏季地表温度的平均值。5个年份的地表温度平均值在2015年发生突变，MODIS地表温度平均值在2015年之前是先下降而后再上升，而反演地表温度在2015年之前呈现先上升再下降而后再上升的趋势，在2015年之后，两种数据地表温度的平均值呈下降趋势。在年际尺度上，两种地表温度平均值有所差异，因此有必要对两种地表温度数据进行相关性分析。

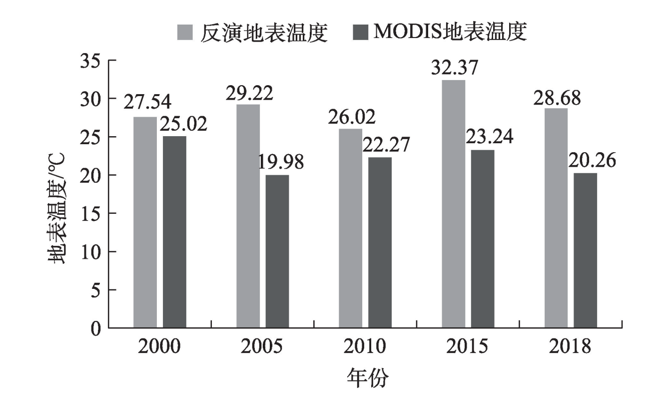


图2 反演地表温度与MODIS地表温度对比

Fig. 2 Comparison between retrieved surface temperature and MODIS surface temperature

2000—2018年反演地表温度与MODIS地表温度呈正相关,其中2015年两种地表温度数据的相关性最高,r为0.59,2018年两种地表温度的相关性最低,其余各年份r值不是很高,在0.43~0.53之间(图3),主要原因为两种地表温度数据的空间分辨率不一致;反演的Landsat数据是由不同时间的影响镶嵌而成,存在一定误差;少量云的存在会影响反演的结果。

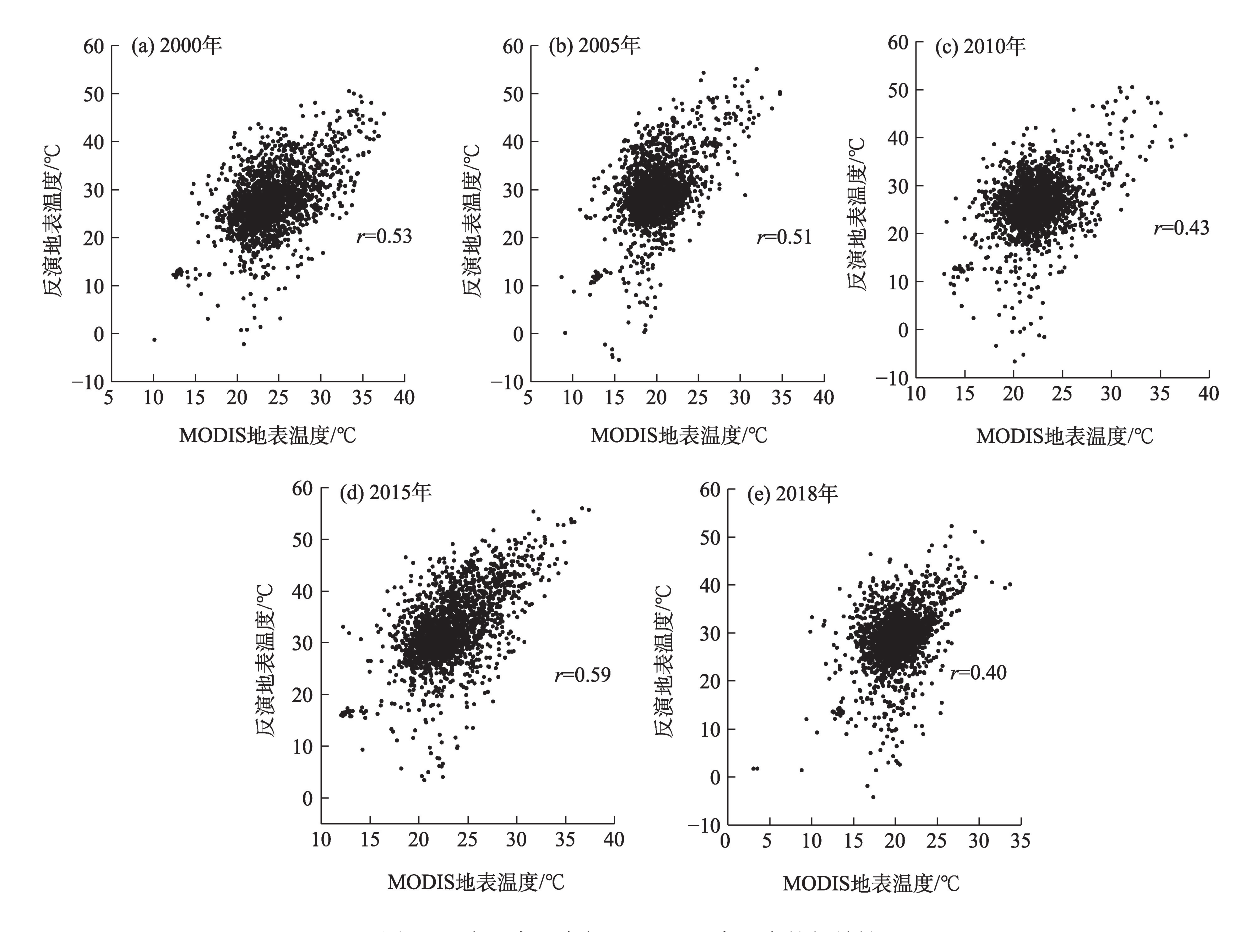


图3　反演地表温度与MODIS地表温度的相关性

Fig. 3　Correlation between retrieved surface temperature and MODIS surface temperature

2.2　地表温度的时空分布特征

利用覃志豪单窗反演算法反演得到黄河源区夏季地表温度空间分布(图4a~g)。整体上,黄河源区北部地表温度最高,可达50 ℃,这是因为北部地区海拔较低,且耕地及建筑用地较多;黄河源中部地区地表温度呈现蓝色的区域为冰川,其温度最低,约为-24 ℃,其他蓝色的区域有部分是云层覆盖,导致地表温度较低呈现蓝色。

局部来看,黄河源区西部的两大湖泊,扎陵湖及鄂陵湖的表面温度相对较低;1995年黄河源区南部、2005年及2010年黄河源区西南部地表温度有负值出现(图4b、d~e),由于零散的云覆盖所导致。

根据线性回归公式(6)计算出7个年份地表温度的变化斜率值(图4h),对地表温度年平均值序列变化进行趋势分析[29],从图中可以看出,1990—2018年,黄河源区北部及中部边缘山区地表温度呈现上升趋势,黄河源西部及东部地区地表温度呈现下降趋势。

2.3　地表温度影响因素分析

地表温度主要受高程、土壤湿度、气候、植被状况、用地类型以及人类活动等因素的共同影响。黄河源区建筑用地少,人类活动范围较小,因此黄河源区地表温度主要受自然因素影响。降水和气温通过水热交换影响了每个像元地表温度的大小;在众多影响因素中,地表高程与地表温度的相关性最高;土壤湿度也影响了地表温度的空间分布,植被及土地利用类型对地表温度的影响主要是通过地表比辐射率体现的[30]。因此,探讨高程、土壤湿度、

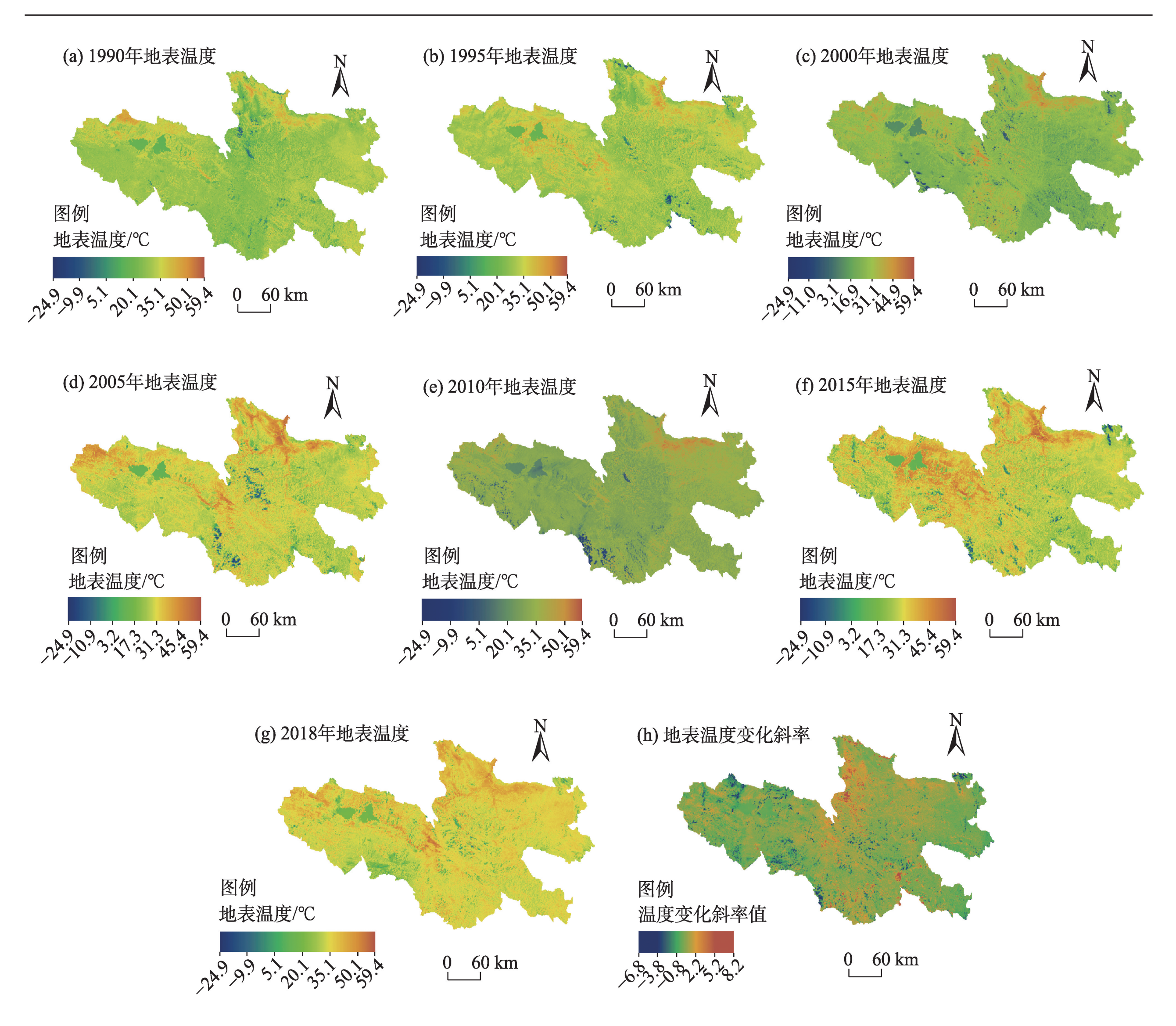


图4 反演地表温度的空间分布及年际变化趋势

Fig. 4 Spatial distribution and interannual variation trend of retrieved surface temperature

气候、植被状况和土地类型等因素对黄河源区夏季地表温度时空分布的影响十分必要。

2.3.1 高程 根据研究区高程数据，选取高程起伏较大、纬度变化小、地物类型变化不大的区域，以保证在高程与地表温度的相关性分析中，高程是最主要的影响因素。提取其7个年份的高程以及地表温度并计算其r值(图5)，各年份地表温度与高程存在明显的负相关关系，r值平均为-0.65，2000、2015、2018年均达0.70以上(图5c、f~g)。高程平均每增高100 m，地表温度下降约0.925 ℃。

2.3.2 土壤湿度 选用GLDAS土壤湿度数据产品(https://disc.gsfc.nasa.gov)，该数据的空间分辨率较为粗糙，仅为0.25°，无法在空间上反映地表温度与土壤湿度的相关关系。但是黄河源区面积大，可以在空间上进行对比，可在一定程度上反映土壤湿度与地表温度的变化情况。黄河源区土壤湿度的高值区分布在研究区的南部及东南部，而低值区域分布在东北部及西部(图6a)。空间上，黄河源区东部及西部地表温度较高，其土壤湿度低；黄河源区东南部地表温度相对较低，其土壤湿度高，某种程度上可以说明地表温度与土壤湿度在空间分布上存在负相关关系(图6)。

2.3.3 气温 将气温栅格数据重新降尺度至30 m空间分辨率，并投影至与地表温度空间分布图一致的坐标系，计算出黄河源区夏季地表温度与夏季气温的相关性空间分布(图7)，整个黄河源区地表温

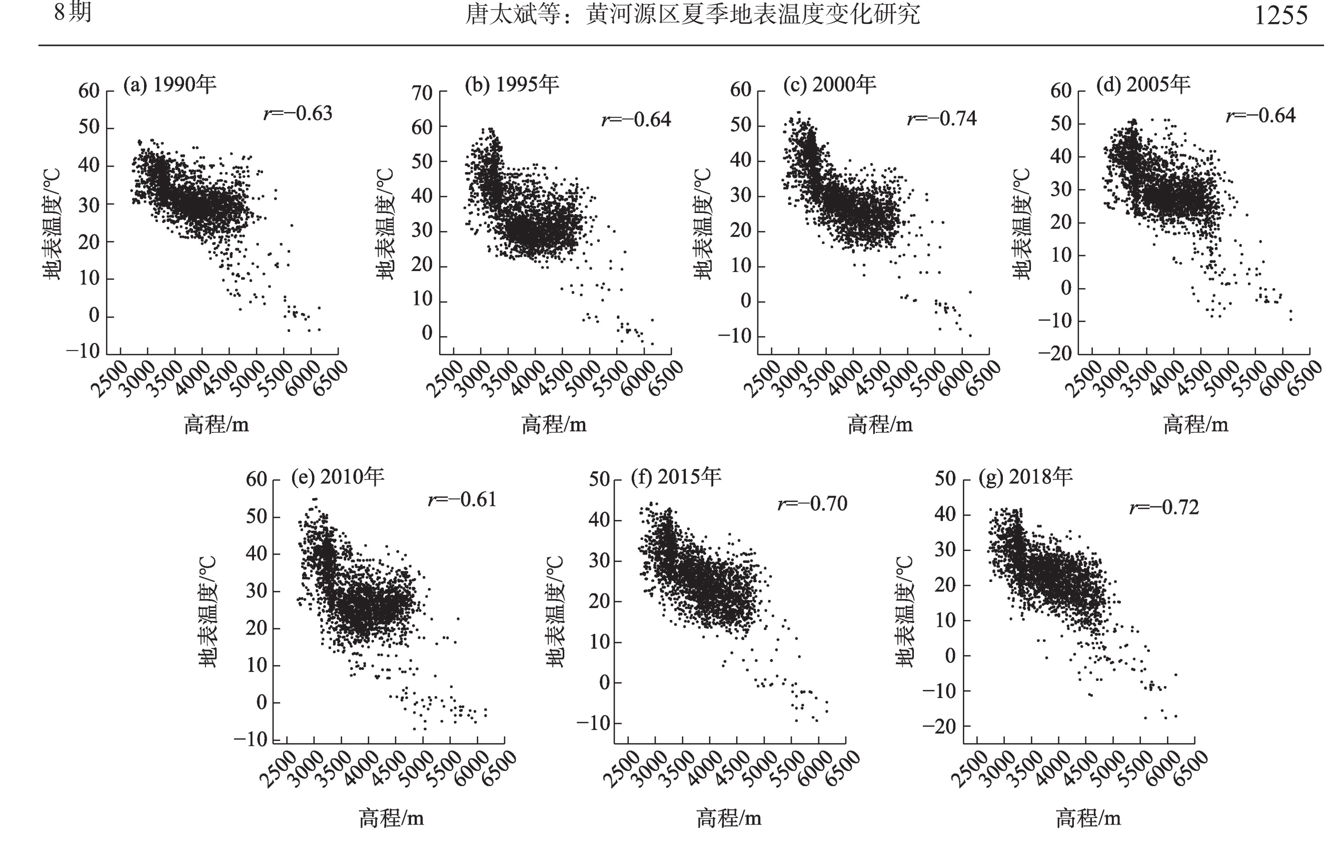


图5　地表温度与高程的相关性

Fig. 5　Correlation between surface temperature and elevation

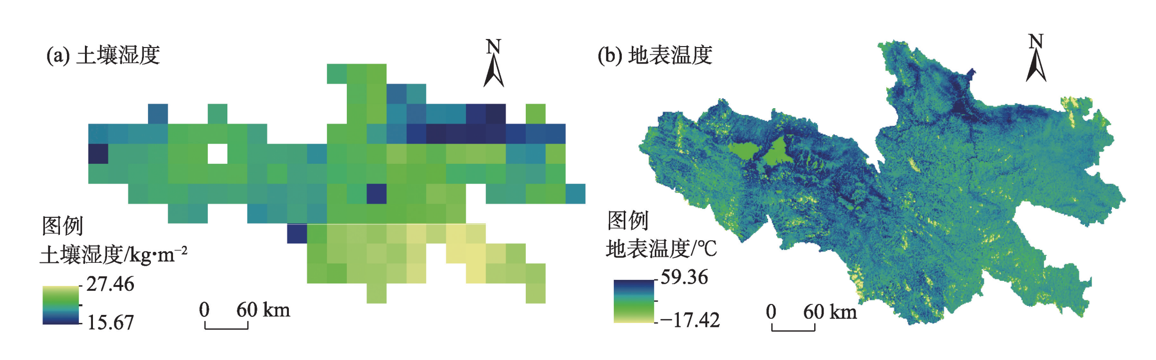


图6　2015年土壤湿度与地表温度的空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of soil moisture and surface temperature in 2015

度与气温呈正相关的部分约占55%，*r*平均值约为0.38，主要分布在黄河源区的西部、北部和东南部山区。源区西部及东部存在明显的分带现象，是由于不同时相的影像镶嵌而成。

2.3.4　降水量　利用ENVI软件计算得出黄河源区夏季地表温度与夏季降水量的相关性空间分布(图8)，进一步统计栅格，其中约70%的像元其*r*为负值，其中*r*小于−0.4的像元约占20%，说明随着该地区降水量的增加，相应的黄河源区地表温度降低，呈负相关关系的像元主要分布在黄河源区西部两大湖泊附近，及黄河源中部山区、南部东部边缘地区。

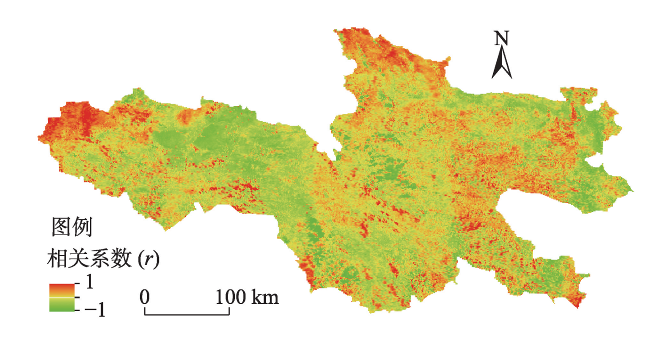


图7　地表温度与气温的相关性

Fig. 7　Correlation between surface temperature and air temperature

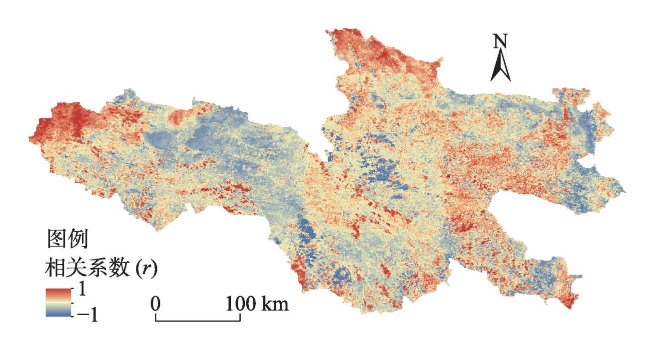


图8 地表温度与降水量的相关性

Fig. 8 Correlation between surface temperature and precipitation

2.3.5 用地类型 提取不同地物类型的地表温度(图9),不难看出,1990—2018年水体的地表温度基本不变,其他地物的地表温度均呈现上升的趋势;冰川与裸地的地表温度升高最快,冰川从1990年平均地表温度−7.0 ℃上升到2018年平均地表温度3.0 ℃,增幅达10.0 ℃;裸地由1990年平均地表温度23.7 ℃上升到2018年的34.5 ℃,增幅达10.8 ℃;耕地、植被的地表温度呈现上升趋势,但增速较缓,分别由1990年平均地表温度27.2 ℃、21.2 ℃上升到2018年的34.1 ℃、27.3 ℃,增幅分别达6.9 ℃、6.1 ℃。

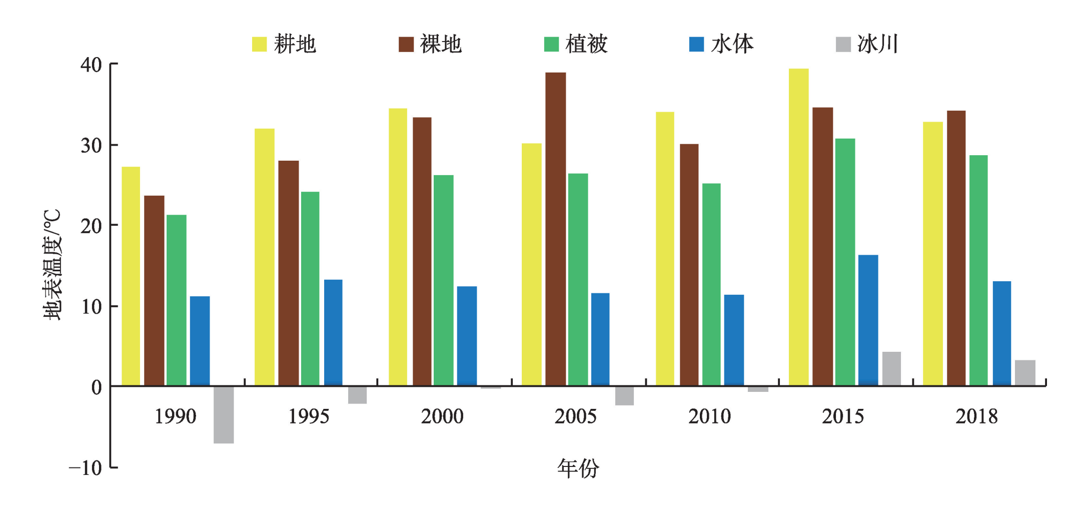


图9 用地类型与地表温度年际变化

Fig. 9 Interannual variation of land use type and surface temperature

3 结 论

本文选用7 a的Landsat卫星数据,利用覃志豪单窗算法反演黄河源区1990—2018年(间隔3~5 a)夏季的地表温度,通过一元线性回归及相关性分析方法,分析得到黄河源区地表温度的时空分布特征和变化趋势及影响因素,结论如下:

(1) 1990—2018年研究区北部及中部边缘山区地表温度呈现上升趋势,研究区西部及东部地区地表温度呈现下降趋势。

(2) 1990—2018年水体的地表温度基本不变,其他地物的地表温度均呈现上升的趋势;冰川与裸土的地表温度升高最快,增幅分别达10.0 ℃、10.8 ℃;耕地及植被的地表温度值增长速度较为缓慢,由于黄河源区植被以草地为主,地表温度对植被覆盖变化的响应存在一定的正相关关系。

(3) 研究区高程与地表温度r为−0.65,即高程平均每升高100 m,地表温度约下降0.925 ℃;黄河源区东部及西部地表温度较高,相应的其土壤湿度较低;黄河源区东南部地表温度相对较低,其土壤湿度较高。

(4) 气温的分布对地表温度的时空分布也有一定影响;降水量与地表温度呈负相关关系,黄河源区约70%的像元其r为负值,说明随着该地区降水量的增加,相应区域的地表温度降低,呈负相关关系的像元主要分布在黄河源区西部两大湖泊附近,及黄河源中部山区、南部东部边缘地区。

参考文献(References)

[1] 翟俊, 山发寿, 仝彩荣, 等. 基于MODIS数据的青海湖流域地表温度反演研究[J]. 盐湖研究, 2009, 17(4): 14−21. [Zhai Jun, Shan Fashou, Tong Cairong, et al. Study on land surface temperature retrieval of Qinghai Lake Basin based on MODIS data[J]. Journal of Salt Lake Research, 2009, 17(4): 14−21.]

[2] 王思维, 易桂花, 高雅萍, 等. 三江源地区基于MODIS数据地表温度与土地覆盖定量关系研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2): 56−61. [Wang Siwei, Yi Guihua, Gao Yaping, et al. The research of quantitative relationship between land surface temperature and land cover in Three-River Source Region based on MODIS data[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(2): 56−61.]

[3] 李欣, 张佳华, 张文忠, 等. 遥感反演地表温度的研究进展[C]//中国气象学会2007年年会生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2007: 72−80. [Li Xin, Zhang Jiahua, Zhang Wenzhong, et al. The research progress of remote sensing inversion of surface temperature[C]//Proceedings of the Ecological Meteorological Business Construction and Agrometeorological Disaster Warning Branch of the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2007: 72−80.]

[4] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456−466. [Qin Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456−466.]

[5] 毛克彪, 覃志豪, 刘伟, 等. 用MODIS影像和单窗算法反演环渤海地区的地表温度[J]. 测绘与空间地理信息, 2004, 27(6): 23−25. [Mao Kebiao, Qin Zhihao, Liu Wei, et al. Retrieval of LST in Bohai Sea rim region by mono-window algorithm and MODIS image[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004, 27(6): 23−25.]

[6] 毛克彪, 覃志豪, 徐斌, 等. 针对ASTER数据的单窗算法[J]. 测绘学院学报, 2005, 22(1): 40−42. [Mao Kebiao, Qin Zhihao, Xu Bin, et al. Method for land surface temperature retrieval from ASTER data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 22(1): 40−42.]

[7] 甘海洪, 金晓媚, 张绪财, 等. 三江源区蒸散量的时空分布特征[J]. 现代地质, 2021, 35(3): 665−674. [Gan Haihong, Jin Xiaomei, Zhang Xucai, et al. Temporal and spatial distribution of evapotranspiration in the Sanjiangyuan region[J]. Geoscience, 2021, 35(3): 665−674.]

[8] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 61−72. [Zheng Ziyan, Lü Meixia, Ma Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 61−72.]

[9] 程慧艳, 王根绪, 王一博, 等. 黄河源区不同植被类型覆盖下季节冻土冻融过程中的土壤温湿空间变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(2): 15−21. [Cheng Huiyan, Wang Genxu, Wang Yibo, et al. Variations of soil temperature and water moisture of seasonal frozen soil with different vegetation coverages in the source region of the Yellow River, China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2008, 44(2): 15−21.]

[10] 柳菲. 地表比辐射率遥感反演方法研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2012. [Liu Fei. Researching of remote sensing inversion method on land surface emissivity[D]. Wuhan: Hubei University, 2012.]

[11] 李玉毛, 何涛, 刘冬. 一元线性回归方法的理论及其应用[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2017, 33(15): 1−2. [Li Yumao, He Tao, Liu Dong. The theory and application of univariate linear regression method[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2017, 33(15): 1−2.]

[12] 徐维超. 相关系数研究综述[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(3): 12−17. [Xu Weichao. A review on correlation coefficients[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29(3): 12−17.]

[13] 张微, 程武学, 倪静. 地表温度反演的算法综述[J]. 绿色科技, 2014(12): 220−222. [Zhang Wei, Cheng Wuxue, Ni Jing. Review of the algorithms of land surface temperature retrieval[J]. Journal of Green Science and Technology, 2014(12): 220−222.]

[14] 朱贞榕, 程朋根, 桂新, 等. 地表温度反演的算法综述[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 70−75. [Zhu Zhenrong, Cheng Penggen, Gui Xin, et al. Overview of surface temperature inversion algorithm[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(5): 70−75.]

[15] 金点点, 宫兆宁. 基于Landsat系列数据地表温度反演算法对比分析——以齐齐哈尔市辖区为例[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 830−841. [Jin Diandian, Gong Zhaoning. Algorithms comparison of land surface temperature retrieval from Landsat series data: A case study in Qiqihar, China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 830−841.]

[16] Cuenca J, Sobrino J A. Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity[J]. Applied Optics, 2004, 43(23): 4598−4602.

[17] Li Z L, Zhang R, Sun X, et al. Experimental system for the study of the directional thermal emission of natural surfaces[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 195−204.

[18] 陈云浩, 宫阿都, 李京. 基于地表辐射亮温标准化的城市热环境遥感研究——以上海市为例[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 462−467. [Chen Yunhao, Gong Adu, Li Jing. Study of urban thermal environment using remote sensing data based on radiation normalization[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(4): 462−467.]

[19] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. 基于Landsat-8数据和劈窗算法的地表温度反演及城市热岛效应研究[J]. 环境监控与预警, 2014, 6(5): 4−14. [Song Ting, Duan Zheng, Liu Junzhi, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data using split-window algorithm and its application on the study of urban heat island effect[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2014, 6(5): 4−14.]

[20] 高懋芳, 覃志豪, 徐斌, 等. 用MODIS数据反演地表温度的基本参数估计方法[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 113−119. [Gao Maofang, Qin Zhihao, Xu Bin, et al. Estimation of the basic parameters

for deriving surface temperature from MODIS data[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(1): 113-119.]

[21] 陈双远, 许方宇, 王飞翔, 等. 中红外大气背景辐射测量系统及误差分析[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 9-18. [Chen Shuangyuan, Xu Fangyu, Wang Feixiang, et al. Measurement system and error analysis of mid-infrared atmospheric background radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 9-18.]

[22] 高懋芳, 覃志豪, 刘三超. MODIS数据反演地表温度的参数敏感性分析[J]. 遥感信息, 2005(6): 3-6. [Gao Maofang, Qin Zhihao, Liu Sanchao. Sensitivity analysis of retrieving land surface temperature from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[J]. Remote Sensing Information, 2005(6): 3-6.]

[23] 黄妙芬, 邢旭峰, 王培娟, 等. 利用LANDSAT/TM热红外通道反演地表温度的三种方法比较[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 132-137. [Huang Miaofen, Xing Xufeng, Wang Peijuan, et al. Comparison between three different methods of retrieving surface temperature from Landsat TM thermal infrared band[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(1): 132-137.]

[24] 王倩倩, 覃志豪, 王斐. 基于多源遥感数据反演地表温度的单窗算法[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 24-26, 62, 113. [Wang Qianqian, Qin Zhihao, Wang Fei. Monor-window algorithm for retrieving land surface temperature based on multi-source remote sensing data[J]. Geography and Geo-information Science, 2012, 28(3): 24-26, 62, 113.]

[25] 宋彩英, 覃志豪, 王斐. 基于Landsat TM的地表温度分解算法对比[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 172-177. [Song Caiying, Qin Zhihao, Wang Fei. Comparison of two models for decomposition of land surface temperature image using Landsat TM data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2015, 27(1): 172-177.]

[26] 刘晶. 基于Landsat-8数据的地表温度反演算法对比[D]. 西安: 长安大学, 2018. [Liu Jing. Comparison of retrieval algorithms for land surface temperature from Landsat-8 imagery[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.]

[27] 覃志豪, Li Wenjuan, Zhang Minghua, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003, 15(2): 37-43. [Qin Zhihao, Li Wenjuan, Zhang Minghua, et al. Estimating of the essential atmospheric parametersof mono window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2003, 15(2): 37-43.]

[28] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996.

[29] 程丹妮, 王颖琪, 程勇翔, 等. 新疆典型沙漠和绿洲植被-水汽-地表温度相关性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 456-466. [Cheng Danni, Wang Yingqi, Cheng Yongxiang, et al. Vegetation-water vapor-land surface temperature correlation analysis of typical deserts and oases in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 456-466.]

[30] 杜军, 高佳佳, 王挺, 等. 2007—2020年西藏草面温度时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1103-1113. [Du Jun, Gao Jiajia, Wang Ting, et al. Spatial and temporal distribution of the grass surface temperature in Tibet from 2007 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1103-1113.]

Change of surface temperature in the source area of the Yellow River in summer

TANG Taibin[1], ZHOU Bao[1], JIN Xiaomei[2], WEI Sailajia[1], MA Tao[1], ZHANG Yongyan[1]

(1. Qinghai Geological Environmental Monitoring Station, Xining 810008, Qinghai, China; 2. China University of Geosciences Beijing, School of Water Resources and Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: Using Landsat satellite data with high spatial resolution, the Qin Zhihao mono window algorithm was used to retrieve the summer (July or August) surface temperature in the source area of the Yellow River from 1990 to 2018 (with an interval of 3−5 years), and correlation analysis was conducted on the retrieval results. The results show that: (1) The correlation coefficient between the average retrieved surface temperature and the average MODIS surface temperature product is not high, about 0.5, mainly due to the inconsistent spatial resolution between Landsat data and MODIS products. (2) The surface temperature of water remains basically unchanged, while the surface temperature of other features shows an upward trend, with glaciers experiencing the fastest increase in surface temperature. (3) There is a significant negative correlation between surface temperature and elevation in the source area of the Yellow River in various years, with an average correlation coefficient of −0.65. (4) In terms of space, there is a negative correlation between the spatial distribution of surface temperature values and soil moisture values in the source area of the Yellow River. (5) Among climate factors, there is a significant negative correlation between precipitation and surface temperature, with regions with a correlation coefficient less than −0.5 accounting for 70% of the entire source area.

Key words: the source area of the Yellow River; surface temperature; remote sensing retrieval; changing characteristics; controlling factors